

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.313.8

1.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕМАГНИТНЫМ ЯКОРЕМ

ELECTROMAGNETIC TORQUE OF VALVE ENGINE WITH NONMAGNETIC ANCHOR

Сапсалева Анатолий Васильевич, д-р техн. наук, профессор каф. «Электроника и электротехника» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sa@koe.ref.nstu.ru. Тел. +79095323216

Давыденко Ольга Борисовна, канд. техн. наук, доцент каф. «Электроника и электротехника» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Касаткина Елена Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент каф. «Электроника и электротехника» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Савин Николай Петрович, старший преподаватель каф. «Электроника и электротехника» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Саидов Сохбон Алиевич, магистрант каф. «Электроника и электротехника» Новосибирского государственного технического университета, Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

Anatoliy V. Sapsalev, Doctor Sc., Novosibirsk State Technical University, 630073, pr. K. Marx, 20, Novosibirsk, Russia. E-mail: sa@koe.ref.nstu.ru. Ph.: +79095323216

Olga B. Davydenko, Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 630073, pr. K. Marx, 20, Novosibirsk, Russia. Ph.: +7(383) 3463237

Elena G. Kasatkina, Cand. Sc., Novosibirsk State Technical University, 630073, pr. K. Marx, 20, Novosibirsk, Russia. Ph.: +7(383) 3463237

Nikolay P. Savin, Senior Lecturer, Novosibirsk State Technical University, 630073, pr. K. Marx, 20, Novosibirsk, Russia.

Sochbon A. Saidov, Master student, Novosibirsk State Technical University, 630073, pr. K. Marx, 20, Novosibirsk, Russia.

Аннотация. Получены расчетные соотношения электромагнитной момента секции вентильного двигателя с немагнитным якорем на интервале коммутации и определено ее общее выражение при 120-градусном законе коммутации. Произведена оценка пульсаций электромагнитного момента, обусловленных дискретной коммутацией секций якорной обмотки.

Ключевые слова: вентильный двигатель; постоянные магниты; индукция магнитного поля; ряды Фурье; электромагнитный момент.

Abstract: The ratios for the electromagnetic moment calculation on the switching period in the section of the BLDC with a non-magnetic armature are obtained and general expression of the electromagnetic force at 120-degree switching law is determined. The estimation of the electromagnetic force ripple caused by discrete switching in the armature winding sections is performed.

Key words: BLDC; permanent magnets; magnetic field induction; Fourier series; electromagnetic moment.

Настоящая работа посвящена анализу электромагнитных моментов бесконтактных двигателей постоянного тока с немагнитным якорем (БДПТ). БДПТ представляют собой сочетание синхронной машины с полупроводниковым коммутатором, переключающим секции обмотки якоря в зависимости от их положения относительно

магнитного поля индуктора и одновременно осуществляющим регулирование скорости перемещения подвижного элемента двигателя. В силу этих причин их часто называют вентильными двигателями (в англоязычной литературе BLDC или PMSM). Бурное развитие силовой полупроводниковой элементной базы и прогресс в производстве термостабильных постоянных

магнитов из материала неодим-железо-бор (Nd-Fe-B) открывают широкие перспективы по разработке вентильных электродвигателей и приводов на их основе. Специальные легирующие добавки способствуют повышению коэрцитивной силы и сохранению работоспособности магнитов при нагреве до $+170^{\circ}\text{C}$ и пятикратном от номинального кратковременном значении момента и тока якоря. За последние десять лет вентильные электродвигатели заняли прочное положение в производственных программах ведущих зарубежных компаний (Сименс, Бош Рексрот, Дженерал Электрик, Ансальдо, Фанук и др.). В большинстве каталогов готовой продукции этих компаний вентильные двигатели с редкоземельными постоянными магнитами представлены на первом месте.

Щеточно-коллекторный узел традиционных машин постоянного тока не только снижает надежность и перегрузочную способность двигателя, но и исключает его использование в агрессивных, взрывоопасных и вакуумно чистых средах. Вентильные двигатели имеют более простую конструкцию и практически свободны от указанных недостатков. Одним из основных препятствий для широкого внедрения вентильных приводов является необходимость датчика положения ротора. Особенно ощутим данный недостаток в оборудовании, которое подвергается значительным механическим воздействиям вибрационного и ударного характера. Исполнительные механизмы различных технологических производств выдвигает такие требования к динамике электроприводов, как глубокий диапазон регулирования скоростью с заданной точностью ее стабилизации на минимуме и высокую точность обработки заданных перемещений с максимальным быстродействием. Эти факторы обуславливают невозможность применения управления вентильным двигателем без датчика положения. Высокие требования к динамике электроприводов с вентильными двигателями обуславливают необходимость оценки не только уровня электромагнитных сил и моментов электрических двигателей, но и их пульсаций, обусловленных дискретной коммутацией фазных обмоток вентильных двигателей.

Для двигателей с магнитоэлектрическим возбуждением реакция якоря пренебрежимо мала. В этом случае нормальная составляющая индукции магнитного поля в воздушном зазоре для сплавов из редкоземельных материалов будет равна [1,2]

$$B_z = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sh}(n\pi h_*) \cdot \sin(n\pi\alpha/2) \cdot \text{ch}(n\pi(z_* + \delta_*))}{n \cdot \text{sh}(n\pi(h_* + \delta_*))} \cdot \cos(n\pi x_*), \quad (1)$$

где B_r – остаточная индукция постоянных магнитов, τ – полюсное деление, $x_* = x/\tau$ и $z_* = z/\tau$ – относительные координаты, отсчитываемые соответственно от оси постоянного магнита вдоль плоскости воздушного зазора и поверхности полюса в воздушном зазоре по высоте магнита, $h_* = h/\tau$ и $\delta_* = \delta/\tau$ – относительные значения высоты магнита и одностороннего воздушного зазора, α – коэффициент полюсного перекрытия.

Среднее значение индукции магнитного поля по объему воздушного зазора, занимаемому обмоткой якоря, будет равно

$$B_{\delta} = \frac{2}{h_2} \int_{-\delta}^{-(\delta-h_2/2)} B_z(x, z) dz,$$

где h_2 – толщина немагнитного якоря.

После подстановки под знак интеграла выражения (1) и интегрирования, получим

$$B_{\delta} = \frac{4B_r}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\text{sh}(n\pi h_*) \sin(n\pi\alpha/2) \text{sh}(n\pi(\delta_* - \Delta_*))}{n^2(\delta_* - \Delta_*) \text{sh}(n\pi(h_* + \delta_*))} \cdot \cos(n\pi x_*), \quad (2)$$

где $\Delta_* = (\delta - h_2/2)/\tau$ – относительная величина воздушного зазора в свету между поверхностями якоря и полюсами индуктора.

Обозначим, как γ_2 – ширину зоны, которую занимает одна секция обмотки якоря на одном полюсном делении ($\gamma_2 \leq \tau/3$). Внутри этой зоны распределение витков обмотки якоря непрерывное. Тогда величина электромагнитной силы, действующей в пределах одного полюсного деления на секцию с N числом витков, в которых протекает ток I , расположенную на расстоянии x от оси магнита параллельно плоскости воздушного зазора в магнитном поле с индукцией B_{δ} , будет определяться выражением

$$F = \frac{IlN}{2a\gamma_*} \int_{x_*-\gamma_*/2}^{x_*+\gamma_*/2} B_{\delta}(x_*) dx_*, \quad (3)$$

где l – активная длина проводника обмотки якоря, $2a$ – число параллельных ветвей обмотки якоря, $\gamma_* = \gamma_2/\tau$.

Подставив в (3) выражение индукции (2), после интегрирования получим

$$F = \frac{N}{2a} Il B_r \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos n\pi x_*,$$

где

$$C_n = \frac{8 \text{sh}(n\pi h_*) \sin(n\pi\alpha/2) \sin(n\pi\gamma_*/2) \text{sh}(n\pi(\delta_* - \Delta_*))}{n^3 \pi^3 \gamma_* (\delta_* - \Delta_*) \cdot \text{sh}(n\pi(h_* + \delta_*))}.$$

Электромагнитный момент, создаваемый секцией ротора при числе полюсов $2p$, будет равен

$$M = 2p \frac{D}{2} F = \frac{pN}{2a} I D l B_r \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos n\pi x_*, \quad (4)$$

где D - среднее значение диаметра якоря.

Аналогично можно получить выражение для ЭДС, наведенной в секции, перемещающейся в воздушном зазоре со скоростью V

$$E = \frac{N}{2a} V l B_r \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos n\pi x_*.$$

Переходя к угловой скорости $V = \omega D / 2$ при числе полюсов $2p$ окончательно получаем

$$E = \frac{pN}{2a} \omega D l B_r \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos n\pi x_*. \quad (5)$$

Полученные выражения для электромагнитного момента и ЭДС двигателя можно представить в безразмерной форме

$$M_* = E_* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos n\pi x_*, \quad (6)$$

$$\text{где } M_* = \frac{M}{I} \frac{2a}{pNDlB_r}, \quad E_* = \frac{E}{\omega} \frac{2a}{pNDlB_r}.$$

На основании выражения (6) можно провести анализ различных схем соединения секций обмотки якоря при различных законах коммутации.

Рассмотрим лучевую обмотку с двуполярным питанием при 120-градусном законе коммутации. Схема питания обмотки от мостового коммутатора и диаграмма работы его силовых ключей приведены на рис. 1, а и в соответственно.

В каждый момент времени коммутатор подключает к источнику питания две секции обмотки, причем соединение секций получается последовательным. Длительность межкоммутационного интервала составляет $\alpha_k = \tau / 3$.

Коммутация производится в момент, когда начало очередной секции, подключаемой к источнику питания совпадает с началом полюсного деления, как это показано на рис. 1, с. Диаграмма токов секций, соответствующая режиму работы ключей коммутатора (рис. 1, в), приведена на рис. 1, d.

Электромагнитный момент, развиваемый двигателем в каждый момент времени, будет равен сумме моментов двух отдельных секций

$$M_* = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos n\pi(x_* - 1/6) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos n\pi(x_* + 1/6).$$

После несложных преобразований получается

$$M_* = \sum_{n=1}^{\infty} 2C_n \cos \frac{n\pi}{6} \cos n\pi x_*.$$

Функция $\cos n\pi x_*$ на интервале коммутации $\alpha_{k*} = \alpha_k / \tau = 1/3$ разлагается в ряд [4].

$$\cos n\pi x_* = \frac{\sin(n\pi/6)}{n\pi/6} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos(6k\pi x_*)}{1 - (6k/n)^2} (-1)^k \right]$$

С учетом данного разложения можно получить выражение для безразмерного момента, справедливое для любого значения текущей координаты в пределах интервала коммутации

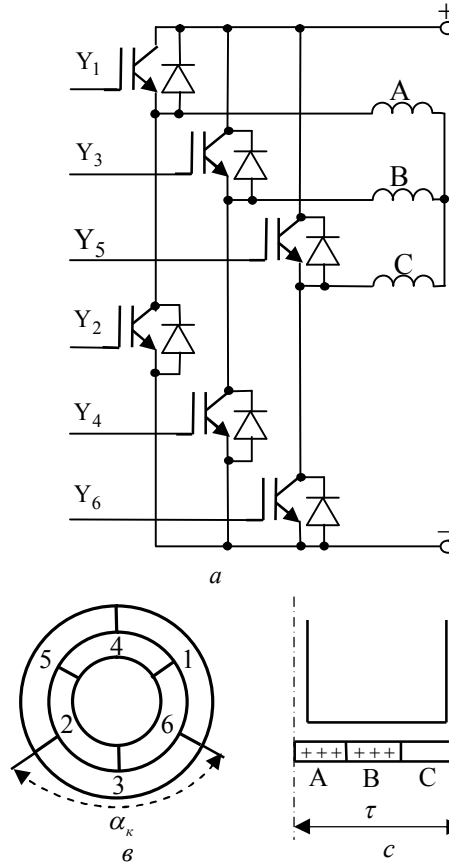


Рис. 1

$$M_* = M_{*0} + \sum_{k=1}^{\infty} M_{*k} \cos 6k\pi x_*,$$

$$\text{где } M_{*0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6C_n \sin(n\pi/3)}{n\pi},$$

$$M_{*k} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{12C_n \sin(n\pi/3)}{[1 - (6k/n)^2] n\pi} (-1)^k.$$

Исследование подобных рядов для реальных параметров бесконтактных двигателей с немагнитным ротором, проведенное в [3], показало, что при оценке постоянной составляющей достаточно ограничиться первым членом ряда по n (составляющие кратные трем в разложении отсутствуют). А при оценке переменной составляющей достаточно учесть первый член ряда по k и 1, 5 и 7 члены ряда по n . Максимальная амплитуда пульсаций второй гармонической составляющей ряда по k будет составлять не более 3% от постоянной составляющей. В результате окончательное выражение для безразмерной силы лучевой обмотки с двух полярным питанием при 120-

градусном законе коммутации можно представить в виде

$$M_* = M_{*0} + K_{II} M_{*0} \cos 6\pi x_*,$$

где $M_{*0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} C_1$, K_{II} – коэффициент пульсаций, равный [4],

$$K_{II} = \frac{M_{*1}}{M_{*0}} = \frac{2}{35} \left(1 - 15.9 \frac{C_5}{C_1} - 18.8 \frac{C_7}{C_1} \right).$$

Аналогично будет выглядеть выражение электромагнитного момента в абсолютных единицах

$$M = M_0 + K_{II} M_0 \cos 6\pi x_*. \quad (7)$$

Среднее значение электромагнитного момента можно выразить формулой

$$M_0 = C_k I,$$

где I – ток секций якорной обмотки, C_k – конструктивная постоянная двигателя, равная

$$C_k = \frac{p l N D B_r}{\pi 2 a} 3\sqrt{3} C_1.$$

Аналогично выглядит выражение для ЭДС, наводимой в секциях якорной обмотки

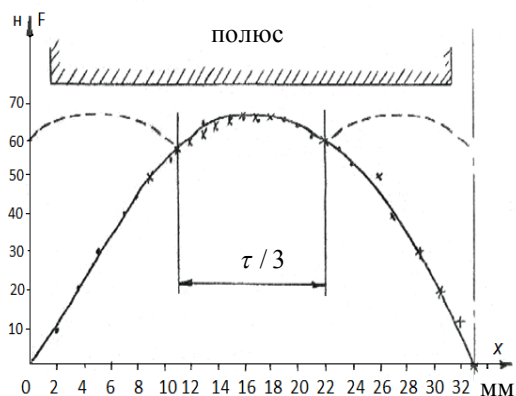
$$E = E_0 + K_{II} E_0 \cos(6\pi x_*), \quad (8)$$

где $E_0 = C_k \omega$, ω – угловая скорость вращения якоря.

Одним из недостатков бесконтактных двигателей постоянного тока являются пульсации силы, связанные с дискретной коммутацией секций якорной обмотки по положению. В [4] показано, что за счет рационального выбора геометрических размеров для линейного бесконтактного двигателя с немагнитным якорем можно получить коэффициент пульсаций силы мене 0.06. Для экспериментального определения пульсаций силы двигателя была снята характеристика зависимости силы от перемещения индуктора относительно якоря на длине полюсного деления, равного 0.033м. Зависимость представлена на рис. 2.

Характеристика показывает, что изменение силы происходит по закону, близкому к синусоидальному, а амплитуда пульсаций примерно равна 6.5%.

На рис. 3 показана осциллограмма пульсаций силы, полученная на основании структурной модели линейного вентильного двигателя с немагнитным якорем при коэффициенте пульсаций 0.065. Осциллограмма снята при силе статического сопротивления, близкой к номинальной силе двигателя. Как видно, пульсации силы, полученные в структурной модели, достаточно точно соответствуют пульсациям силы реального двигателя.



• - при смещении в прямом направлении
* - при смещении в обратном направлении

Рис. 2

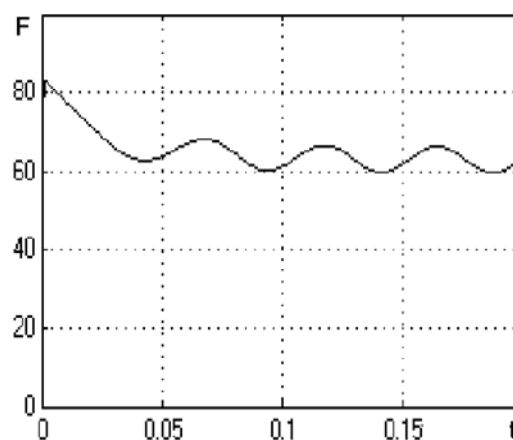


Рис. 3. Осциллограмма пульсаций

Библиографический список

1. Афанасьев В.В. Магнитное поле индукторов с постоянными магнитами без полюсных наконечников / В.В. Афанасьев, О.Н. Веселовский, А.Ю. Зибарев // Изв. вузов. Электромеханика. – 1978. - №3. – С. 248-253.
2. Зечихин Б.С., Тимершин Ф.Г. Исследование поля магнитоэлектрического генератора с индуктором без полюсных наконечников. Известия АН СССР, сер. «Энергетика и транспорт», №1, 1975.
3. Зибарев А.Ю. Разработка и исследование линейного бесконтактного двигателя, питаемого от полупроводникового коммутатора.: Дис. ... канд. техн. наук. - Новосибирск, 1977. - 198 с.
4. Сапсалаев А.В. Разработка и исследование силовых элементов электропривода поступательного перемещения роботов: Дис. ... канд. техн. наук. - Новосибирск, 1979. - 218 с.